

Коржов А.В.¹, Кирпичникова И.М.¹, Бухтояров В.Ф.¹, Круглов Г.А.²

¹ Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

² Южно-Уральский государственный аграрный университет

ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИЛОВОГО ТРЁХЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ 6(10) КВ В РАБОЧИХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ С ПОЗИЦИИ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

В работе представлены результаты исследований изменения характера нагрузки в кабельных линиях 6(10) кВ, питающих промышленный и коммунально-бытовой сектор. По результатам данных исследований оценено время и участки кабельной сети, где ожидается максимальное значение индукции магнитного поля вблизи кабельных трасс. Для оценки влияния магнитного поля с позиций электромагнитной совместимости и безопасности была разработана методика экспериментального исследования и компьютерная модель трёхжильного кабеля в программе ANSYS EM (Maxwell). Исследование распределения магнитного поля проведено в рабочих и аварийных режимах работы кабеля с учётом установленных графиков нагрузки в рабочих режимах и принятых уставок релейной защиты в режимах коротких замыканий. Оценены допустимые расстояния до трасс кабельных линий в рабочих и аварийных режимах работы по критерию электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: кабельные линии, график нагрузки, магнитное поле, режимы работы, охрана труда (электроэнергетика).

ВВЕДЕНИЕ

Рост нагрузок в городской кабельной распределительной сети, увеличение плотности кабельных линий, внедрение микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики приводят к необходимости оценки их электромагнитной совместимости. Несмотря на то, что в настоящее время известны работы по оценке влияния магнитного поля (МП) кабеля по критериям электромагнитной совместимости [1], оптимальной конфигурации прокладки с позиции снижения их магнитного поля [2, 3], работы по снижению уровня магнитного поля за счёт разработки экранов [4–6], остаётся необходимость проведения данной оценки с учётом: характера нагрузки КЛ, вероятных токов короткого замыкания (КЗ) и принятых уставок релейной защиты и автоматики (РЗА) [7].

Целью данных исследований была поставлена оценка распределения магнитного поля на примере трёхжильных силовых кабелей с учётом характера нагрузки в рабочих режимах и выбранных уставок РЗА в режимах коротких замыканий для сопоставления с действующими нормативными документами.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика исследования включала три этапа.

Этап № 1. На примере кабельных линий, эксплуатируемых в коммунальных сетях г. Нефтекамска, было исследовано колебание нагрузки в течение суток и года на примере фидера 6 кВ, питающего коммунально-бытовую нагрузку города и фидера, питающего промышленные предприятия. Примеры графиков изменения токовой нагрузки в течение года и за характерные сутки приведены на **рис. 1, 2**.

Построение годовых и суточных графиков нагрузки позволяет определить количество часов в году и в течение суток, когда кабельная линия несёт наибольшую

нагрузку. В данное время ожидается наибольшая величина МП, что может негативно влиять как на микропроцессорные устройства, так и на человека. В **табл. 1** представлен анализ для двух рассматриваемых фидеров.

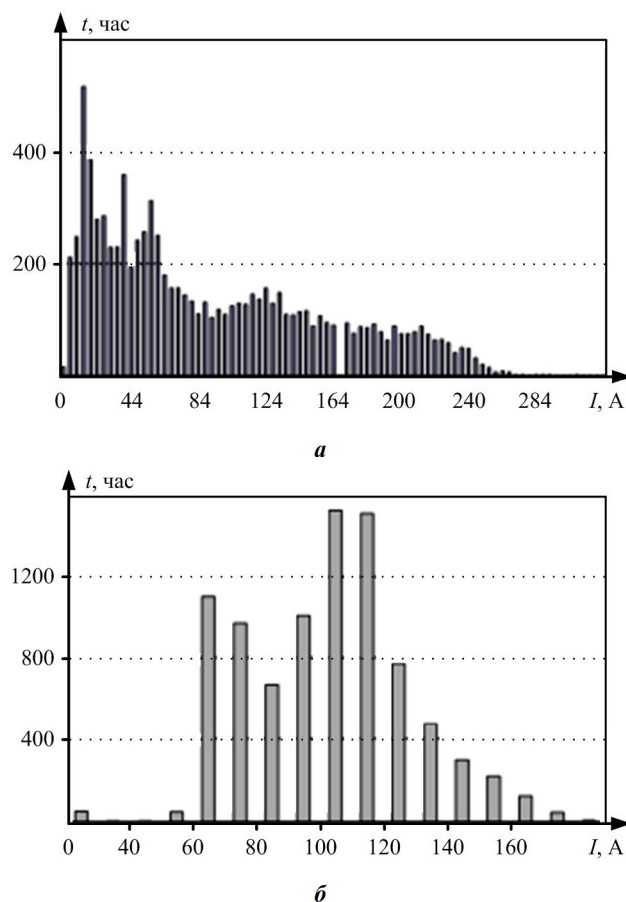


Рис. 1. Годовые графики нагрузок: а – фидер №1, питающий промышленное предприятие; б – фидер №2, питающий коммунально-бытовую нагрузку

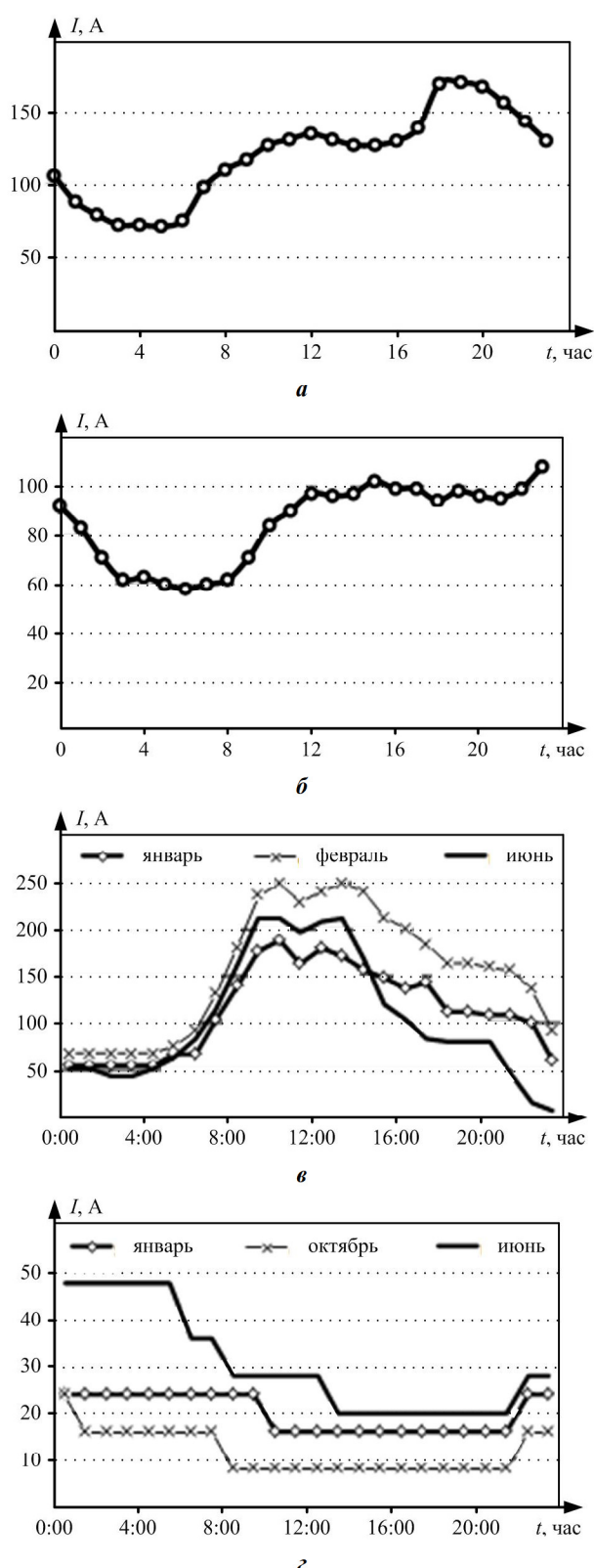


Рис. 2. Суточные графики нагрузок: а – фидер, питающий коммунально-бытовую нагрузку, рабочий день – январь; б – фидер, питающий коммунально-бытовую нагрузку, выходной день – июнь; в – фидер, питающий промышленную нагрузку (двухсменный график работы), рабочие дни; г – фидер, питающий промышленную нагрузку (двухсменный график работы), выходные дни

Длительно допустимый ток принят по сечению головного кабеля согласно [7]: для кабеля ААШВ 6 кВ с сечением жил 240 мм² в 390 А; для кабеля

с сечением жил 185 мм² в 340 А; для кабеля с сечением жил 150 мм² в 300 А.

По результатам анализа коммунально-бытовой нагрузки можно отметить, что для данных кабельных сетей характерны следующие моменты: 1) нагрузка в выходные и рабочие дни одинакова с небольшим ростом зимой; 2) токи КЗ ниже из-за большей длины и применения, как правило, меньшей мощности трансформаторных подстанций (ТП 400, 630 кВА), чем для промышленной нагрузки; 3) отсутствие высоковольтной двигательной нагрузки; 4) ниже уставки РЗиА по току и времени – для токовой отсечки (ТО) и максимальной токовой защиты (МТЗ); 5) ниже требуемое сечение кабельных линий по условиям термической стойкости и невозгорания 120–150 мм² [8, 9].

По результатам анализа промышленной нагрузки можно отметить, что для данных кабельных сетей характерны следующие моменты: 1) колебания нагрузки зависят от сменности работы, как правило, выше в первую смену, ниже во вторую из-за останова некоторых технологических линий и прекращения работы административного персонала; 2) токи КЗ выше, так как питающие подстанции расположены вблизи заводов, питающие КЛ короче, применяются, как правило, ТП 630 и 1000 кВА; 3) присутствует большое количество низковольтных и высоковольтных двигателей; 4) уставки ТО и МТЗ выше по току и времени для возможности отстройки от пусковых токов электрических двигателей; 5) в связи с этим выше и сечение по условиям термической стойкости и невозгорания 185–240 мм² [8, 9].

Этап № 2. На втором этапе был проведён анализ ожидаемых токов КЗ и времени существования данных режимов, определяемых уставками РЗиА. На рис. 3 представлен типовой участок схемы городской распределительной сети 6 кВ. Сводные результаты анализа принятых уставок РЗиА на примере коммунальных сетей г. Нефтекамска представлены в табл. 2.

Результаты расчёта уставок РЗиА для других характерных фидеров на примере схемы города Нефтекамска показывают существенный разброс по току и времени срабатывания, что также существенно влияет на условия выбора сечения кабеля по условиям невозгорания. Примеры расчёта уставок по времени МТЗ на вводах 6 кВ и тока трёхфазного КЗ для других трёх фидеров показали следующие результаты: №1 – 3,4 с/13143 А; №2 – 2,9 с/9189 А; №3 – 3,5 с/25968 А. Существенный разброс по току и времени срабатывания РЗиА обусловлен величиной токов КЗ на шинах 6(10) кВ подстанции, длиной питающих и отходящих линий и характером нагрузки.

Этап № 3. На третьем этапе было проведено математическое моделирование в программном комплексе ANSYS Maxwell. Были проанализированы рабочие режимы работы кабелей и режимы КЗ. Данный анализ также необходим для оценки ресурсных показателей работы КЛ [10, 11]. Оценка корректности результатов моделирования проводилась путем сопоставления с экспериментальными замерами распределения МП с применением анализатора Narda EFA-300 вблизи действующих и опытных кабельных линий (рис. 4).

Таблица 1

Анализ графиков нагрузок

| Продолжительность нагрузки в течение года и суток | Нагрузка менее 30% от длительно допустимого тока (%) / время существования данной нагрузки (час) | Нагрузка от 30 до 60% от длительно допустимого тока (%) / время существования данной нагрузки (час) | Нагрузка от 60 до 90% от длительно допустимого тока (%) / время существования данной нагрузки (час) | Нагрузка более 90% от длительно допустимого тока (%) / время существования данной нагрузки (час) |
|---|--|---|---|--|
| Фидер №1 (год) | 70/6132 | 28,7/2514 | 1/87 | 0,3/27 |
| Фидер №2 (год) | 61/5344 | 39/3416 | 0 | 0 |
| Фидер бытовая нагрузка (январь сутки) | 29/7 | 71/17 | 0 | 0 |
| Фидер бытовая нагрузка (июнь сутки) | 92/22 | 8/2 | 0 | 0 |
| Фидер промышленная нагрузка (рабочий день сутки) | 33/8 | 66/16 | 1 | 0 |
| Фидер промышленная нагрузка (выходной день сутки) | 100/24 | 0 | 0 | 0 |

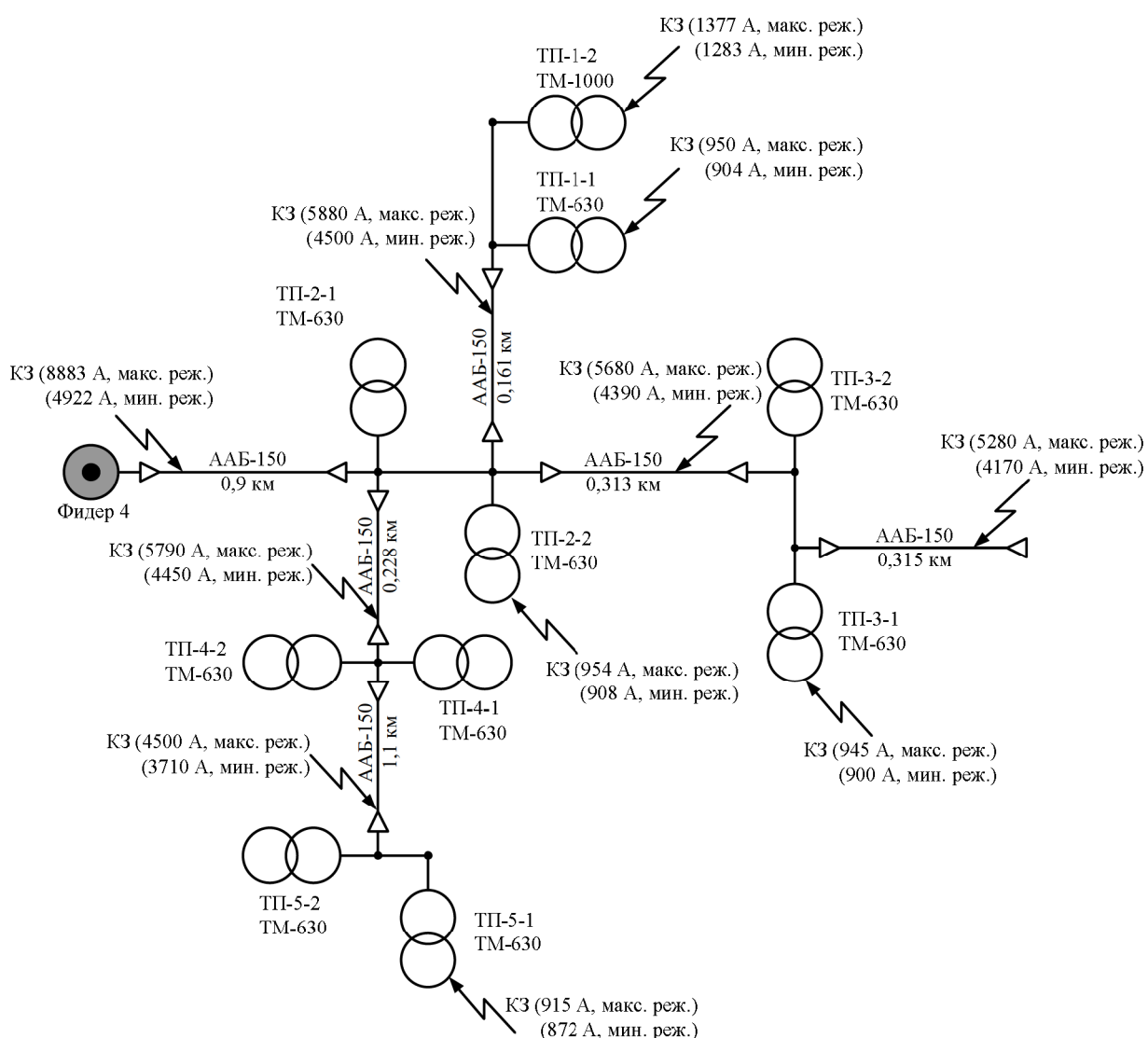
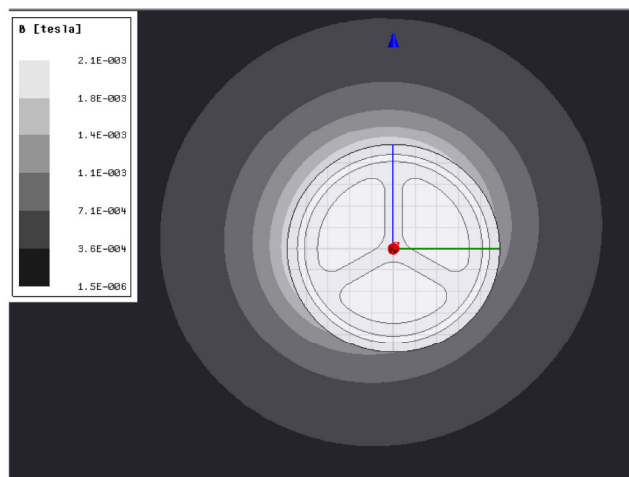


Рис. 3. Участок кабельной сети (на примере г. Нефтекамска)

Таблица 2

Расчётные уставки релейной защиты (согласно схеме на рис. 3)

| Фидер | Уставка по току срабатывания МТЗ, А | Уставка по времени срабатывания МТЗ, с | Уставка по току срабатывания ТО, А | Уставка по времени срабатывания ТО, с |
|-------|-------------------------------------|--|------------------------------------|---------------------------------------|
| №1 | 1500 | 1 | 3400 | 0 |
| №2 | 450 | 1 | 1620 | 0 |



а



б

Рис. 4. Исследование распределения МП трёхжильного кабеля: а – картина распределения МП кабеля сечением жил 240 мм² в модели (рабочий режим 390 А); б – экспериментальная оценка на КЛ

Сводные результаты расчётного значения индукции магнитного поля представлены в табл. 3. В соответствии с нормативными документами для неэлектротехнического персонала допустимый уровень МП в жилых, общественных помещениях и зонах отдыха установлен в 10 мкТл. Согласно требованиям по ЭМС по ГОСТ Р 50649-94 (МЭК 1000-4-9-93 при испытаниях на устойчивость к импульсному магнитному полю по 3-й степени жёсткости испытаний испытуемое устройство должно выдерживать напряжённость 100 А/м. Согласно ГОСТ Р 50648-94 (МЭК 1000-4-8-93) устойчивость к магнитному полю промышленной частоты по 3-й степени жёсткости испытаний для непрерывного МП составляет 10 А/м.

Оценивая уровни МП в рабочих режимах можно отметить, что превышение ПДУ по МП, согласно действующим нормативным материалам, можно ожидать в течение не более ≈40 % (3500) часов в год и на расстоянии от кабеля менее ≈30 см (табл. 3).

В режиме КЗ превышение ПДУ по МП наблюдается на поверхности грунта с учётом минимальной глубины прокладки кабеля на 0,7 м.

Уровни магнитных полей выше в промышленной зоне, так как на заводах внутри цехов зачастую применяется укладка кабелей 6(10) кВ до внутрицеховых трансформаторных подстанций на лотках по стенам, что негативно сказывается на работающем персонале и электронной аппаратуре, где как раз должны соблюдаться повышенные требования по ЭМС.

Таблица 3

Результаты оценки напряжённости магнитного поля (А/м) и сопоставления с нормативами по электромагнитной совместимости

| Параметры режима | | Расстояние от поверхности кабеля, перпендикулярное к поверхности одной из жил, см | | | | | |
|--|-------------------------------------|---|------|-----|-----|-----|-----|
| | | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 70 |
| Рабочий режим: длительно допустимый ток 390 А | Напряжённость магнитного поля (А/м) | 1600 | 60 | 19 | 9 | 5 | 2 |
| | Превышение ПДУ для населения | да | да | да | нет | нет | нет |
| | Превышение ПДУ по ГОСТ Р 50648-94 | да | да | да | нет | нет | нет |
| Режим КЗ: ток 9000 А | Напряжённость магнитного поля (А/м) | 37000 | 1388 | 427 | 205 | 120 | 41 |
| | Превышение ПДУ для населения | да | да | да | да | да | да |
| | Превышение ПДУ по ГОСТ Р 50649-94 | да | да | да | да | да | нет |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведена экспериментальная оценка графиков нагрузки кабельных линий, питающих промышленные и коммунально-бытовую нагрузку. Оценено время существования наиболее опасного, с позиций электромагнитной совместимости, режима их работы.

2. Оценено распределение магнитного поля в режимах номинальной нагрузки и режимах коротких замыканий. Показано, что наблюдается превышение ПДУ в режиме номинальной нагрузки для расстояний менее ≈ 30 см, а в режиме короткого замыкания данное расстояние может превышать 0,7 м (минимальная глубина прокладки КЛ в грунте).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ippolito, M.G. Attenuation of low frequency magnetic fields produced by HV underground power cables / M.G. Ippolito, A. Puccio, G. Ala, S. Ganci // IEEE Conference Publications in 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). 2015. P. 1–5. DOI: 10.1109/UPEC.2015.7339774.
2. Hernández Jiménez, V.J. Optimal geometric configurations for mitigation of magnetic fields of underground power lines / V.J. Hernández Jiménez, E.D. Castronuovo // IEEE Conference Publications. 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. 2015. P. 1–6. DOI: 10.1109/PTC.2015.7232457.
3. Karady, G.G. The feasibility of magnetic field reduction by phase relationship optimization in cable systems / G.G. Karady, C.V. Nunez, R. Raghavan // IEEE Transactions on Power Delivery. 1998. Vol. 13 (2). P. 647–654. DOI: 10.1109/61.660956.
4. Del-Pino-López, J.C. Magnetic field shielding optimization in underground power cable duct banks / J.C. Del-Pino-

- López, P. Cruz-Romero, L. Serrano-Iribarnegaray, J. Martínez-Román // Electric Power Syst. Res. 2014. 114. P. 21–27. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.04.001.
5. Machado V.M. Magnetic Field Mitigation Shielding of Underground Power Cables / V.M. Machado // IEEE Trans. Magn. 2012. 48 (2). P. 707–710. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2174775.
6. Грешняков Г.В. Комплексная оценка технических и эксплуатационных характеристик XLPE – кабельных систем среднего и высокого напряжения: дис. ... доктора техн. наук / Г.В. Грешняков. Санкт-Петербург, 2018. 236 с.
7. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. СПб.: УВЦИЗ, 2005.
8. Коржов А.В., Сидоров А.И., Коржова О.В. Выбор уставок релейной защиты и автоматики в кабельных сетях 6–10 кВ с учётом теплового режима изоляции // Промышленная энергетика. 2009. № 6. С. 2–9.
9. Коржов А.В. Методика выбора уставок релейной защиты и зонное автоматическое повторное включение в кабельной сети 6(10) кВ для ресурсосбережения изоляции и улучшения условий труда / А.В. Коржов // Промышленная энергетика. 2013. № 2. С. 10–16.
10. Korzhov, A.V. The effect of the operating regime of 6(10) kV power cables on parameters of partial discharges in insulation / A.V. Korzhov, A.A. Kozin // Russian Electrical Engineering. 2013. Vol. 84, No. 10. pp. 586–590. DOI: 10.3103/S1068371213100088.
11. Korzhov A.V., Sapozhnikov S.B., Ignatova A.V. Variation of dissipative properties of 6(10) kV cable insulation as a supplementary diagnostic criterion // In Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE Conference. 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076257.

Поступила в редакцию 10 октября 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SAFETY-RELATED RESEARCH OF A 6 (10) kV POWER TRIPLE-CORE CABLE MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION IN OPERATIONAL AND EMERGENCY MODES

Anton V. Korzhov

D.Sc. (Eng.), Assistant Professor, Electric Grids, Networks and Supply Systems Department, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: korzhovav@susu.ru.

Irina M. Kirpichnikova

D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Electric Grids, Networks and Supply Systems Department, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: kirpichnikovaim@susu.ru.

Vasilii F. Bukhtoyarov

D.Sc. (Eng.), Professor, Life Safety Department, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: bukhtoyarovvf@susu.ru.

Gennadiy A. Kruglov

D.Sc. (Eng.), Professor, Electricity Supply and Process Automation Department, South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: bgd-susu@mail.ru.

The paper presents the results of studies of changes in the nature of the load in cable lines of 6 (10) kV, feeding the industrial and household sector. Based on the results of these studies, the paper estimates the time and sections of the cable network where the maximum value of the magnetic field induction near the cable routes is expected. To assess the influence of the magnetic field from the standpoint of electromagnetic compatibility and safety, a technique of experimental research and a computer model of a three-core cable in the ANSYS EM (Maxwell) program were developed. The

study of the distribution of the magnetic field was carried out in the operational and emergency modes of cable operation, taking into account the established load schedules in the operating modes and the adopted relay protection settings in the short-circuit modes. The paper also estimates the allowable distances to cable lines in operational and emergency modes according to the electromagnetic compatibility criterion.

Keywords: cable lines, load diagram, magnetic field, operating modes, labor protection (electric power industry).

REFERENCES

1. Ippolito M.G., Puccio A., Ala G., Ganci S. Attenuation of low frequency magnetic fields produced by HV underground power cables. *IEEE Conference Publications in 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2015, pp. 1–5. DOI: 10.1109/UPEC.2015.7339774.
2. Hernández Jiménez V.J., Castronuovo E.D. Optimal geometric configurations for mitigation of magnetic fields of underground power lines. *IEEE Conference Publications*, 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/PTC.2015.7232457.
3. Karady G.G., Nunez C.V., Raghavan R. The feasibility of magnetic field reduction by phase relationship optimization in cable systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, vol. 13 (2), pp. 647–654. DOI: 10.1109/61.660956.
4. Del-Pino-López J.C., Cruz-Romero P., Serrano-Iribarnegaray L., Martínez-Román J. Magnetic field shielding optimization in underground power cable duct banks. *Electric Power Syst. Res.*, 2014, vol. 114, pp. 21–27. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.04.001.
5. Machado V.M. Magnetic Field Mitigation Shielding of Underground Power Cables. *IEEE Trans. Magn.*, 2012, vol. 48 (2), pp. 707–710. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2174775.
6. Greshnyakov G.V. *Kompleksnaya otsenka tekhnicheskikh i ekspluatatsionnykh kharakteristik XLPE – kabel'nykh sistem srednego i vysokogo napryazheniya: dis. ... doktora tekhn. nauk* [A Comprehensive Assessment of the Technical and Operational Characteristics of XLPE - Medium and High Voltage Cable Systems: Dis. ... Doctor tech. Sciences]. St. Petersburg, 2018. 236 p.
7. *Pravila ustroystva elektroustanovok (PUE)* [Electrical Installation Rules]. 7th edition, St. Petersburg, UVSIZ Publ., 2005.
8. Korzhov A.V., Sidorov A.I., Korzhova O.V. [Selection of Relay Protection and Automation Settings in Cable Networks of 6-10 kV, Taking into Account the Thermal Isolation Mode]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Energy], 2009, no. 6, pp. 2–9.
9. Korzhov A.V. [The method of selecting the settings of relay protection and zone automatic reclosing in the cable network of 6 (10) kV for resource-saving insulation and improving working conditions]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Energy], 2013, no. 2, pp. 10–16.
10. Korzhov A.V., Kozin A.A. The effect of the operating regime of 6(10)-kV power cables on parameters of partial discharges in insulation. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 10, pp. 586–590. DOI: 10.3103/S1068371213100088.
11. Korzhov A.V., Sapozhnikov S.B., Ignatova A.V. Variation of dissipative properties of 6(10) kV cable insulation as a supplementary diagnostic criterion. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), IEEE Conference, 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076257.

Коржов А.В., Кирпичникова И.М., Бухтояров В.Ф., Круглов Г.А. Исследования распределения магнитного поля силового трёхжильного кабеля 6(10) кВ в рабочих и аварийных режимах с позиции электробезопасности / О.В. Газизова, А.А. Аллаяров, Ю.Н. Кондрашова, Н.Т. Патшин // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 4(41). С. 30-35. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-30-35](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-30-35)

Korzhov A.V., Kirpichnikova I.M., Bukhtoyarov V.F., Kruglov G.A. Safety-related Research of a 6 (10) kV Power Triple-core Cable Magnetic Field Distribution in Operational and Emergency Modes. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 30-35. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-30-35](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-30-35)